Chunks in Chemie- und Physikaufgaben

- Zusammenhang zwischen Gedächtniskapazität und Aufgabenkomplexität -

Felix Stindt*, Alexander Strahl+, Rainer Müller*

*Technische Universität Braunschweig, IFdN, Abt. Physik & Physikdidaktik
+Universität Salzburg, School of Education, AG Didaktik der Physik
felix.stindt@gmx.net, alexander.strahl@sbg.ac.at, rainer.mueller@tu-bs.de

Kurzfassung

Der Zusammenhang zwischen der Gedächtniskapazität von Lernenden und der Komplexität einer gestellten Aufgabe wurde in den 1980er Jahren durch Johnstone und El-Banna [1] untersucht. Die Ergebnisse sind richtungsweisend für die Gestaltung von Aufgaben, gerieten jedoch im Laufe der Jahre besonders in Deutschland weitgehend in Vergessenheit. Im vorliegenden Artikel werden die Inhalte dieser Studie von Chemie- auf Physikaufgaben übertragen.

Von 16 Studierenden der Technischen Universität Braunschweig wurden die Gedächtniskapazitäten bestimmt und diese mit den Ergebnissen eines Testes in Beziehung gesetzt, der aus sieben unterschiedlich schwierigen physikalischen Aufgaben bestand. Folgende These wurde dabei untersucht: Die Überlastung des Arbeitsgedächtnisses einer Testperson ist dafür verantwortlich, dass bestimmte Aufgaben nicht gelöst werden können. Schülerinnen / Schüler bzw. Studierende mit einer Gedächtniskapazität von X Chunks (englisch: Klumpen oder Brocken) können nur Aufgaben mit einer Anzahl von maximal Z Lösungsschritten bearbeiten, wenn $Z \leq X$ gilt.

Trotz der geringen Teilnehmerzahl konnten die Ergebnisse von Johnstone und El-Banna reproduziert werden. Ein Zusammenhang zwischen Gedächtniskapazität und Aufgabenkomplexität ist klar erkennbar.

1. Einleitung

In der Psychologie wird die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses durch die Anzahl von „Chunks“ bestimmt, die eine Person aufnehmen und wiedergeben kann. Ein „Chunk“ bezeichnet dabei „*eine bedeutungsvolle Informationseinheit*“ (Zimbardo & Gerrig, 2004, S. 305) [2] und kann aus einer beliebigen Anzahl Informationen (Bits) zusammengesetzt sein (Miller, 1956) [3]. Ein Beispiel verdeutlicht den Unterschied: Die Zahlenkombination

1 – 6 – 4 – 3 – 1 – 8 – 7 – 9 – 1 – 8 – 9 – 5 – 2 – 0 – 1 – 2

besteht aus 16 Zahlen. Doch eine Physikerin bzw. ein Physiker sieht in diesen Zahlen vier bedeutende Jahreszahlen: 1643 – Geburtstag von Isaac Newton, 1879 – Geburtstag von Albert Einstein, 1895 – Entdeckung der Röntgenstrahlen und 2012 – experimenteller Nachweis des Higgs-Bosons. Eine Physikerin bzw. ein Physiker verknüpft demnach diese 16 Zahlen zu vier Chunks. Dieser Prozess nennt sich Chunking. Aufgrund von Chunking können mehr Informationen im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden, denn dessen Kapazität scheint auf 7 ± 2 Chunks begrenzt zu sein (Miller, 1956) [3]. Ohne das Chunking wäre es also nicht möglich, diese 16 Zahlen im Gedächtnis zu behalten. Vier Jahreszahlen überfordern hingegen die wenigsten.

Johnstone und El-Banna veröffentlichten bereits im Jahr 1986 eine Studie, in der der Zusammenhang zwischen Gedächtniskapazität und Aufgabenkomplexität für Chemieaufgaben untersucht wurde (Johnstone und El-Banna, 1986) [1]. Ihre Annahme war, dass die Überlastung des Arbeitsgedächtnisses von Schülerinnen bzw. Schülern schuld daran sei, dass sie gewisse Aufgaben aus dem Chemieunterricht nicht lösen können. Zu diesem Zweck wurde die Gedächtniskapazität, im Folgenden mit X bezeichnet, von insgesamt 272 Schülerinnen und Schülern und 364 Studentinnen und Studenten mit Standardtests aus der kognitiven Psychologie gemessen. Im Anschluss daran bearbeiteten die Testpersonen Chemieaufgaben unterschiedlicher Komplexität. Die Komplexität einer Aufgabe wurde in der einfachst denkbaren Weise definiert: durch die Anzahl der Lösungsschritte pro Aufgabe (im Folgenden mit Z bezeichnet). Die folgende Hypothese wurde untersucht:

Lernende mit einer Gedächtniskapazität von $X = 5$ können nur Aufgaben mit einer Komplexität mit $Z \leq 5$ lösen. Bei schwierigeren Aufgaben scheitern sie. Analog sind $X = 6$ Schülerinnen / Schüler in der Lage, $Z \leq 6$ Aufgaben zu bearbeiten und so weiter.

Die nach der Hypothese erwarteten Ergebnisse sehen folgendermaßen aus:

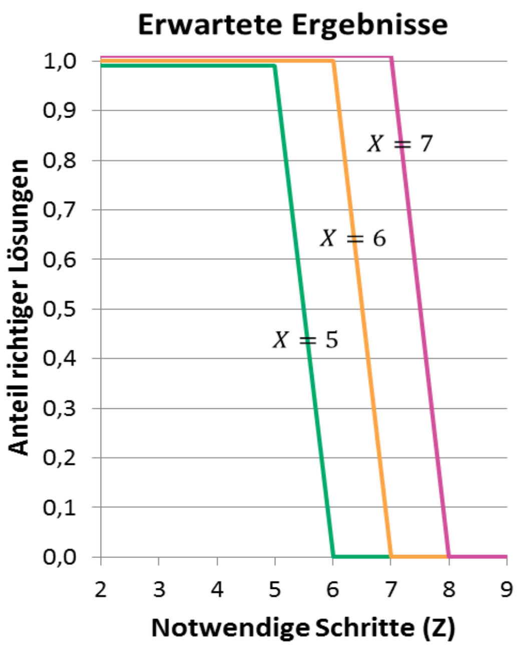

Abb. 1: Erwartete Ergebnisse vgl. (Johnstone und El-Banna, 1986, S. 82) [1]. Anteil richtiger Lösungen über die für die Aufgabe notwendigen Schritte Z. Schüler mit einer Gedächtniskapazität von X = 5 bearbeiten demnach alle Aufgaben mit Z ≤ 5 richtig und versagen bei Aufgaben mit Z > 5. Analoges gilt für Schüler mit X = 6 und X = 7.

Die tatsächlichen Ergebnisse einer Schülergruppe können der nachstehenden Abbildung entnommen werden:

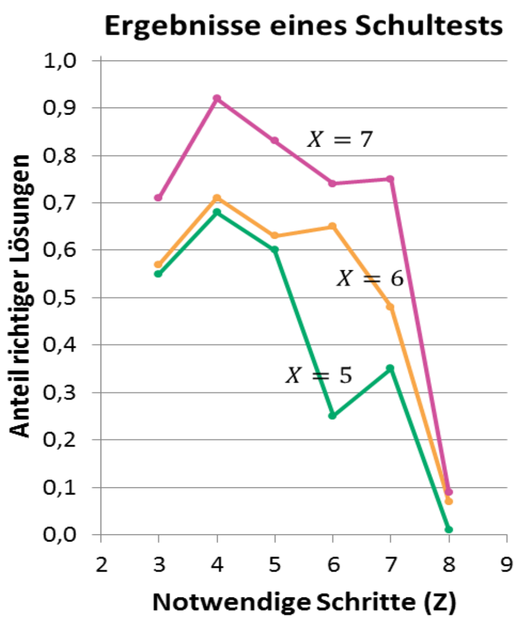

Abb. 2: Ergebnis eines Schultestes vgl. (Johnstone & El-Banna, 1986, S. 82 - 83) [1]. Auftragung des Anteils richtiger Lösungen über die für die Aufgabe notwendigen Schritte Z in einem Schultest. Dabei wurden die Testpersonen zur Auswertung in jeweils drei Gruppen entsprechend ihrer Gedächtniskapazität X eingeteilt.

Es ist für alle drei Gruppen ein deutlicher Rückgang des Prozentsatzes gelöster Aufgaben nach den vorhergesagten Lösungsschritten erkennbar.

Der Graph aus Abbildung 2 entspricht nicht dem Ideal aus Abbildung 1. Zwei Besonderheiten sind zu beobachten. Die Frage mit Z = 4 war wohl für alle drei Gruppen leichter zu beantworten als die Frage mit Z = 3. Weiterhin ist der Anstieg der Schüler mit X = 5 bei der Z = 7 Frage verblüffend. Die Erklärung führt zu einem weiteren wichtigen Punkt: Johnstone und El-Banna geben an, dass die Schülerinnen und Schüler von ihrem Lehrer einen „Kniff“ zur Lösung dieser speziellen Art Aufgabe bekommen hatten (Johnstone & El-Banna, 1986 S. 82) [1]. Diese Besonderheit, die auch Grund für den Anstieg bei der Z = 4 Frage sein könnte, lässt folgendes vermuten:

Mit Hilfe einer Strategie lässt sich der Mangel an Gedächtniskapazität ausgleichen (vgl. Experten-Novizen-Modell (Anderson, 1996, S. 281 - 284) [4], (Johnstone & El-Banna, 1986) [1], (Ormsby, 2011) [5]).

Uns stellte sich die Frage, ob dieser Zusammenhang lediglich bei Chemieaufgaben festgestellt werden kann, oder ob auch bei Physikaufgaben ein deutlicher Zusammenhang besteht. Sollte dies der Fall sein, könnte diese Idee ein wichtiger Indikator bei der Frage nach der Lösbarkeit einer Aufgabe, sowohl in Tests und Klausuren, als auch auf Arbeitsblättern und anderen Unterrichtsmaterialen sein.

Zu diesem Zweck wurde an der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen einer Masterarbeit versucht, die Ergebnisse von Johnstone und El-Banna für Physikaufgaben zu reproduzieren. Die daraus resultierende Studie wird im Folgenden vorgestellt.

2. Eigene Untersuchung im Bereich der Physik

In der in Braunschweig durchgeführten Studie wurde ähnlich verfahren, wie im Artikel von Johnstone und El-Banna beschrieben:

In einem ersten Testteil wurde die Gedächtniskapazität der Testpersonen mit Hilfe des *Digit Span Backwards Tests* bestimmt: Beim *Digit Span Backwards Test* werden der Testperson Zahlenfolgen verschiedener Längen präsentiert. Dies geschieht durch das Vorlesen der einzelnen Ziffern mit einem zeitlichen Abstand von etwa einer Sekunde. Die Anzahl der Ziffern beginnt mit drei und steigert sich im Laufe des Tests. Aufgabe der Testpersonen ist es, die vorgelesenen Zahlen rückwärts wiederzugeben, bei 7 – 4 – 8 also 8 – 4 – 7. Die Rückwärtswiedergabe der Zahlen soll vermeiden, dass die Probanden die Zahlen zusammenfassen oder Merkhilfen anwenden, also „Chunking“ betreiben. Dazu haben die Probanden so viel Zeit, wie sie benötigen. Bei drei aufeinander folgenden richtigen Antworten erhöht sich der Komplexitätsgrad (eine Ziffer mehr), bei drei aufeinander folgenden falschen Antworten ist der Test beendet (Sbordone, Saul, & Purisch, 2007) [6]. Es ist besonders wichtig, dass dieser *Digit Span Backwards Test* unmittelbar vor oder nach dem zweiten Testteil durchgeführt wird. Nur so kann eine konstante Gedächtniskapazität der Probanden über den kompletten Test hinweg angenommen werden (Pascual-Leone, 1970, S. 305) [7].

Der zweite Teil des Tests besteht aus dem schriftlichen Bearbeiten von sieben physikalischen Aufgaben. Diese stammen alle aus dem Gebiet der Mechanik und sind theoretisch für eine Abiturientin bzw. einen Abiturienten lösbar. Wie bereits oben erläutert, variieren die Aufgaben hinsichtlich der Anzahl der notwendigen Lösungsschritte von drei bis hin zu neun Schritten. Als Beispiel soll an dieser Stelle die Aufgabe mit fünf notwendigen Schritten betrachtet werden. Die Aufgabenstellung ist folgende:

Herr Meier fährt mit seinem Auto insgesamt 20 km auf der Autobahn. Die ersten 10 km ist die Strecke frei und er kann 100 km/h fahren. Auf den zweiten 10 km ist jedoch eine Baustelle, in der er nur 50 km/h fahren kann. Berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeit seiner Autobahnfahrt.

Die Lösung gliedert sich in folgende Schritte:

1) *Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist definiert als Quotient aus der gesamten zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit: (in Formelsammlung nachschlagen)*

$$\bar{v} = \frac{s_{ges}}{t_{ges}}$$

2) *Zur Bestimmung der Gesamtzeit werden beide Abschnitte einzeln betrachtet. In beiden liegt eine geradlinig gleichförmige Bewegung zu Grunde: (Bewegung bestimmen)*

$$v = \frac{s}{t}$$

3) *Diese Formel wird nach der Zeit umgestellt und diese für beide Abschnitte bestimmt: (umstellen und ausrechnen)*

$$t = \frac{s}{v}$$

$$t_1 = \frac{10\,\mathrm{km}}{100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}} = 0{,}1\,\mathrm{h}$$

$$t_2 = \frac{10\,\mathrm{km}}{50\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}} = 0{,}2\,\mathrm{h}$$

4) *Die Gesamtzeit ist die Summe beider Einzelzeiten: (mathematische Operation ausführen)*

$$t_{ges} = t_1 + t_2$$

$$t_{ges} = 0{,}3\,\mathrm{h}$$

5) *Die Durchschnittsgeschwindigkeit kann nun bestimmt werden. Sie beträgt nicht, wie man vielleicht denken könnte,* 75 km/h. *(umstellen und ausrechnen)*

$$\bar{v} = \frac{20\,\mathrm{km}}{0{,}3\,\mathrm{h}}$$

$$\bar{v} = 66{,}67\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$$

Die Beispielaufgabe hat fünf Lösungsschritte.

Hinter jedem Schritt in der Musterlösung findet sich eine Zusammenfassung bzw. Einordnung. Auf diese Weise wurden die Lösungsschritte der sieben Aufgaben zu neun Gruppen zusammengefasst:

- Energieansatz
- umstellen und ausrechnen
- in Formelsammlung nachschlagen
- Antwort finden
- Bewegung bestimmen
- mathematische Operation ausführen
- Einheit umrechnen
- mathematischen Zusammenhang finden
- physikalischen Zusammenhang finden

Es ist wichtig, darauf zu achten, welchen Wissensstand die Testpersonen aufweisen. Bei Schülerinnen und Schülern der neunten Klasse müssten die angegebenen Schritte wahrscheinlich verfeinert werden und bei erfahrenen Physiklehrerinnen und Physiklehrern reichen für einige Aufgaben weniger Schritte.

Insgesamt nahmen 16 Studentinnen und Studenten der Technischen Universität Braunschweig an der Studie teil. Unter diesen 16 Probanden waren zwei Studierende mit dem Studiengang „Master Lehramt am Gymnasium“, die sich beide im dritten Mastersemester befinden, also in ihrem neunten Semester im Lehramtsstudium. Die restlichen 14 Testpersonen studieren im Studiengang „2-Fächer-Bachelor mit dem Studienziel Lehramt an Grund-, Haupt- und Realschulen“ im dritten (13 Personen) bzw. ersten (eine Person) Fachsemester. Alle Probanden haben als eines ihrer beiden Fächer „Physik“, entweder im Haupt- oder im Nebenfach. Als Hilfsmittel durften die Studierenden einen Taschenrechner und eine zusammengestellte Formelsammlung (Meyer & Schmidt 2007) [8] benutzen.

Alle Aufgaben, Lösungen, die Formelsammlung und der Digit Span Backwards Test sind online auf www.strahl.info unter Materialien abzurufen Link [9].

3. Ergebnisse der Studie

Bevor die ermittelten Gedächtniskapazitäten mit den Lösungen der Mechanikaufgaben verglichen werden, soll zunächst nur auf die Ergebnisse des *Digit Span Backwards Test*s eingegangen werden:

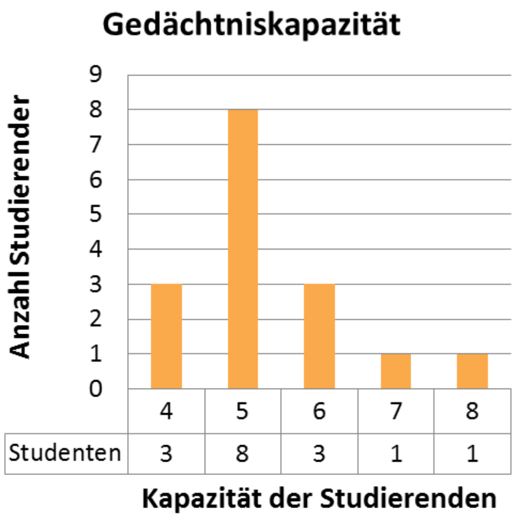

Abb. 3: Gedächtniskapazität der teilnehmenden Studierenden.

In unserer Studie ergab sich ein Mittelwert von 5,31 ± 1,04 für die Gedächtniskapazität. Dieser Wert ist etwas geringer als der von Johnstone und El-Banna Ermittelte von 5,87 ± 0,81 (Johnstone & El-Banna, 1986) [1]. Dennoch liegt er im von Miller angegebenen Intervall von 7 ± 2 (Miller, 1956) [3] und passt auch zu den Werten von Cowan von 4 ± 1 (Paas & Sweller, 2012, S. 28) [10]. Besonders interessant war die Art und Weise, wie die Testpersonen versuchten, sich die einzelnen Ziffern zu merken. Bei nahezu allen Probanden war in der Wiedergabe der Zahlen ein Rhythmus erkennbar. So gruppierten sie die Ziffern zu Zweier- oder Dreierblöcken und gaben jeweils die Blöcke mit Pausen voneinander getrennt wieder.

Bei einer Auftragung der Anteile richtiger Lösungen über der Anzahl notwendiger Schritte Z pro Aufgabe ergibt sich in unserer Studie ein Verlauf (siehe Abb. 4), der an die Ergebnisse von Johnstone und El-Banna erinnert (siehe Abb. 2).

Anhand des Graphen kann man folgendes ablesen: Der Anteil der richtigen Lösungen bei den Aufgaben mit drei, vier bzw. fünf Schritten ist recht hoch (62,50 % bei Z = 3 und Z = 5, 43,75 % bei Z = 4). Danach folgt ein deutlicher „Absturz“. Der Anteil richtiger Lösungen liegt bei den Aufgaben mit sechs bis neun Schritten lediglich zwischen 0,00 % und 12,50 %. Diese Ergebnisse passen gut zu denen des Gedächtnistests: Die durchschnittliche Gedächtniskapazität der Testpersonen liegt zwischen fünf und sechs Chunks (5,31 Chunks). Genau dazwischen erfolgt der „Absturz“ der richtigen Antworten. Dies entspricht dem von Johnstone und El-Banna gefundenem Zusammenhang (Johnstone & El-Banna, 1986) [1], (Johnstone, 1983) [11], (Johnstone, 1984) [12], (Johnstone & Wham, 1982) [13].

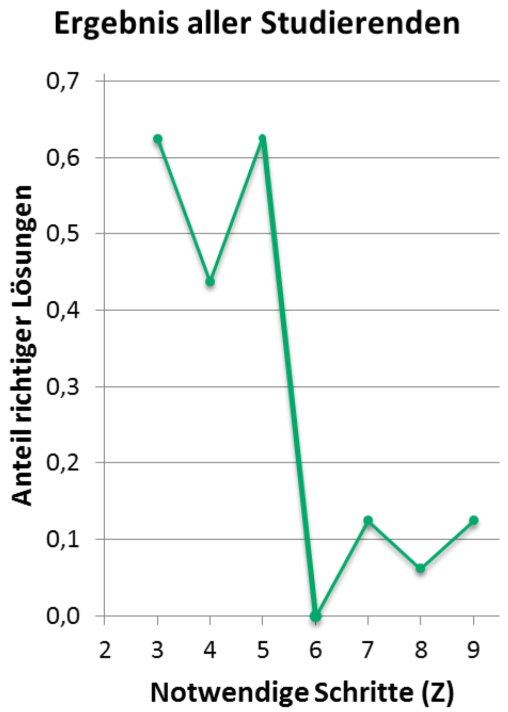

Abb. 4: Gesamtergebnisse aller Studierenden. Aufgetragen ist der Anteil richtiger Lösungen über der Anzahl notwendiger Schritte Z. Es ist ein deutlicher “Absturz” der Kurve zwischen Z = 5 und Z = 6 erkennbar.

Eine Aufteilung der Studierenden nach ihren Gedächtniskapazitäten wie bei Johnstone und El-Banna ist in unserer Studie nicht sinnvoll. Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl liefert dies keine aussagekräftigen Ergebnisse.

4. Zusammenfassung

Zunächst soll erwähnt werden, dass die Ergebnisse der vorgestellten Studie trotz der geringen Teilnehmerzahl von 16 Studierenden erstaunlich gut zu der Theorie von Johnstone und El-Banna aus den 1980er Jahren passen (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 4). Daher wäre eine weiterführende Studie mit einer größeren Teilnehmerzahl sehr aufschlussreich und könnte noch weitere Erkenntnisse liefern.

Aber schon bei dieser kleinen Testgruppe lässt sich der Schluss ziehen, dass die Theorie von Johnstone und El-Banna auf die Physik übertragbar ist. Es kann vermutet werden, dass auch ähnliche Studien in der Biologie, Mathematik oder in anderen Fächern ähnliche Ergebnisse liefern würden. Der Vergleich zwischen Gedächtniskapazität von Schülerinnen / Schülern bzw. Studierenden und der Aufgabenkomplexität bzw. Anzahl der Lösungsschritte könnte somit ein wichtiger Faktor bei der Konzeption von Aufgaben, Klausuren oder Arbeitsblättern sein.

5. Folgerungen aus den Ergebnissen

- Lehrerinnen und Lehrer müssen sich darüber bewusst sein, dass die Gedächtniskapazität gerade von jüngeren Schülern schnell durch eine ungünstig gestellte Aufgabe überschritten werden kann, da das Arbeitsgedächtnis von Kindern und Jugendlichen noch nicht so viele Informationen speichern und verarbeiten kann, wie das eines Erwachsenen (vgl. [7]).
- Ziel eines gelungenen Unterrichts muss es daher unter anderem sein, die Schülerinnen und Schüler mit notwendigen Strategien auszustatten, um die Arbeitsweise von Experten wenigstens nachzuahmen. So ist ein Arbeiten „über" der eigenen Gedächtniskapazität möglich (vgl. Experten-Novizen-Modell (Anderson, 1996, S. 281 - 284) [4], (Johnstone & El-Banna, 1986) [1], (Ormsby, 2011) [5]).
- Neues Wissen muss im Unterricht stets an Bekanntes anschließen, um das Bilden neuronaler Netze zu erleichtern (vgl. (Myers, 2008, S. 68) [14]).
- Regelmäßiges Üben und Lernen von bestimmten Regeln (oft abwertend als Kochrezeptaufgaben bezeichnet) gehört genauso zum Unterricht, wie kompetenzorientierte Aufgaben.
- Eine Aufgabe bzw. ein Arbeitsblatt muss stets so konzipiert sein, dass die intrinsische und extrinsische Belastung der Schüler angemessen ist, damit die gewünschte lernbezogene Belastung maximal werden kann (vgl. (Paas, Renkl, & Sweller, 2004, S. 3) [10]).
- Lernstrategien wie das Chunking, Rehearsal oder das Bilden von Hierarchien sollten im Unterricht vermittelt und geübt werden.
- Eine zu komplexe Aufgabe kann in mehrere Teilaufgaben zerlegt werden, sodass die notwendige Gedächtniskapazität für jede Teilaufgabe im Rahmen des für Schülerinnen und Schülern Möglichen bleibt. Das dadurch mögliche Lösen von schweren Aufgaben kann Kompetenzerleben fördern.

6. Ausblick

Da sich auch schon bei einer geringen Probandenanzahl herauszustellen scheint, dass die Idee von Johnstone et al. sich auch auf Physikaufgaben anwenden lässt, scheint es wichtig zu sein, dies intensiver zu testen.

- Als erstes sollten die Aufgaben etwas verfeinert werden. Aufgabe 1 mit sechs Schritten scheint zu schwierig zu sein, da sie von keinem gelöst wurde.
- Die Aufgaben entstammen ausschließlich dem Themengebiet der Mechanik. Hier ist zu überlegen, ob man für andere Themengebiete Aufgabensets erstellt.
- Selbstverständlich muss die Studie mit mehr Probanden durchgeführt werden. Hier sollten sowohl Schülerinnen und Schüler, als auch Studierende berücksichtigt werden.
- Es sollte überprüft werden, ob durch gelernte Strategien Lösung von Aufgaben über dem Chunkniveau der Probanden möglich ist.
- Es ist zu überlegen, ob die Idee der Aufgaben-Charakterisierung durch Lösungsschritte und deren Lösungswahrscheinlichkeit durch Ermittlung der Chunks auch in anderen Gebieten (Mathematik, Biologie, etc.) möglich ist.

7. Literatur

[1] Johnstone, A. H.; El-Banna, H. (1986): Capacities, demands and processes - a predictive model for science education. *Education in Chemistry, 23*, S. 80-84.

[2] Zimbardo, P. G.; Gerrig, R. J. (2004): *Psychologie* (16. Ausg.). (R. Grad, M. Nagler, B. Ricker, Hrsg., R. Grad, M. Nagler, & B. Ricker, Übers.) München, Boston, San Franzisco, Harlow, Don Mills, Sydney, Mexico City, Madrid, Amsterdam: Pearson Studium.

[3] Miller, G. A. (1956): The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review*(Vol. 101, No. 2), S. 343-352.

[4] Anderson, J. R. (1996): Kognitive Psychologie (2. Ausg.). (J. Grabowski, R. Graf, Hrsg., J. Grabowski, & R. Graf, Übers.) Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

[5] Ormsby, B. (2011): Ormsby - Herausforderungen kreativ meistern - Mastering Challenges Creatively. Abgerufen am 3. Dezember 2013 von http://www.ormsby.at/problemloesung-novizen-experten/

[6] Sbordone, R. J.; Saul, R. E.; Purisch, A. D. (2007): Neuropsychology for Psychologists, Health Care Professionals, and Attorneys Third Edition (3, illustriert, überarbeitet Ausg.). CRC Press.

[7] Pascual-Leone, J. (1970): A Mathematical Model for the Transition Rule in Piaget's Developmental Stages. Acta Psychologica, 32, S. 301-345.

[8] Meyer, L.; Schmidt, G.-D. (2007): Formelsammlung. Berlin, Frankfurt a. M.: Duden Paetec Schulbuchverlag.

[9] Link: Aufgaben, Lösungen, Formelsammlung, Digit Span Backwards Test http://www.strahl.info/_veroeffentlichungen/2014_PhyDid_B_Chunks_in_Chemie_und_Physikaufgaben_Zusaetze.pdf

[10] Paas, F.; Renkl, A.; Sweller, J. (2004): Cognitive Load Theory: Instructional Implications of the Interaction between Information Structures

and Cognitive Architecture. Instructional Science(32), S. 1-8.

[11] Johnstone, A. (1983): Chemical Education Research. Facts, Findings, and Consequences. Journal of Chemical Education, Volume 60 (Number 11), S. 968-971.

[12] Johnstone, A. (1984): New Stars for the Teacher to Steer by? Journal of Chemical Education, Volume 61(Number 10), S. 847-849.

[13] Johnstone, A.; Wham, A. (1982): The demands of practical work. Education in Chemistry, 19, S. 71-73.

[14] Myers, D. G. (2008): Psychologie (2. Ausg.). (M. Reiss, Übers.) New York, Basingstoke: Springer Medizin Verlag Heidelberg.